

NEEWS 現地型強震預警於花蓮地震中之性能表現

Performance of the NEEWS Earthquake Early Warning System during the February 6 2018 Mw 6.2 Hualien Earthquake

許丁友¹ 林沛暘² 王修賢³ 江宏偉⁴ 郭俊翔⁵ 黃靖閑⁶

¹ 台灣科技大學營建工程系 助理教授 tyhsu@mail.ntust.edu.tw, (02-2737-6581)
臺灣建築科技中心，國立臺灣科技大學，臺北，臺灣

² 國家地震工程研究中心 研究員

³ 國家地震工程研究中心 專案佐理研究員

⁴ 國家地震工程研究中心 助理研究員

⁵ 國家地震工程研究中心 副研究員

⁶ 國家地震工程研究中心 技術師

科技部計畫編號：MOST 106-2625-M-011-001

摘要

國家地震工程研究中心正於台灣建置強震預警系統(NCREE's Earthquake Early Warning System, NEEWS)，該系統同時接收國震中心開發的現地型及氣象局的區域型兩種方法所發布之預警資訊。當任一方法所預測的最大地表加速度超過設定的門檻時，便立即發布強震警報。於 2018 年 2 月 6 日花蓮發生了規模 6.2 的地震，造成 17 名死亡、285 名受傷、4 棟建築倒塌、超過 175 棟建築受損。在花蓮地震中，28 個 NEEWS 的測站紀錄了當時的預警資訊，本研究探討兩種強震預警方法的最大地表加速度預測準確率、所提供的應變時間、以及所發布警報的表現。

關鍵字：強震預警、現地型、NEEWS、花蓮地震、最大地表加速度

Abstract

The National Center for Research on Earthquake Engineering, Taiwan, has developed an Earthquake Early Warning System (NEEWS). The NEEWS predicts peak ground acceleration (PGA) using an on-site approach, whereas the Central Weather Bureau (CWB), Taiwan, uses a regional approach. Earthquake alerts are issued at the NEEWS stations once PGA reaches a preassigned PGA threshold, regardless of the approach used. An earthquake with a magnitude of 6.2 and a focal depth of 10.0 km struck Hualien, in Eastern Taiwan, on February 6, 2018. It resulted in 17 fatalities and 285 injuries, 4 collapsed buildings, and damage to more than 175 buildings. During the earthquake, the system performance of 28 NEEWS stations was documented. In this study, we compare and discuss the accuracy of the PGA predictions, lead times, and classification performance of both approaches.

Keywords: NEEWS, on-site earthquake early warning, Hualien earthquake, PGA

一、前言

台灣容易受到地震破壞而造成嚴重災害，除了台灣已知的 33 條活斷層(由中央地質調查所發表)，未知斷層亦會引發嚴重傷亡和財產損失(例如:2016 年造成南台灣 117 人罹難和 247 棟建築物受損的美濃地震)。而區域型強震預警系統無法總是即時地發布地震警報，尤其是地震發生後不久就會有強烈搖晃的震央鄰近區域。

國家地震工程研究中心(NCREE)自 2009 年就開始研發現地型強震預(on-site EEW system)，給予地震時極易遭受到破壞的區域(即震央鄰近區域)更多的預警時間。近年來，現地型方法已被

全球數篇研究作為研究主題(Allen 2009; Böse et al. 2012; Carranza et al. 2013; Caruso et al. 2017; Emolo et al. 2016; Hsu et al. 2013; Kanamori 2005; Nakamura 1998; Odaka et al. 2003; Peng et al. 2015; Wu et al. 2013; Zollo et al. 2010)。國震中心(NCREE)以有限的預算首先在數座小學設立現地型強震預警系統(NEEWS)，此系統在 2013 年數個強度中等的地震有較好的表現，因此在 2014 年底，台灣教育部和科技部開始在全國中小學設置 NEEWS，並計畫於 2018 年底設置大約 90 座 NEEWS 來提供 3400 所學校強震預警。

現地型預警模式係採用新開發之人工智慧技術(Hsu 等, 2013)，該技術自動於觸發後即時萃取重要的地震參數，並於三秒後預測該次地震於該測站可能的最大地表加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)，當 PGA 超出預設門檻值則發出警報。地震參數包含地震主導周期、最大加速度振幅、最大速度振幅、最大位移振幅、絕對累積速度和速率平方積分等六個。我們採用了一些台灣具代表性的強震(1992-2006 年間)來測試和驗證 SVM 的預測模型，之後更使用了在 1992-2006 年間所有的地震數據做測試，而測試的結果頗為良好。NEEWS 在規模 6.5 的美濃地震中的傑出表現已被記錄下來並發表於著名國際期刊(Hsu 等, 2016)。2017 年，中保防災科技公司與國震中心共同建置網路系統來接收現地型和區域型強震預警系統的資料，並據以發布警報。由於區域型強震預警系統至少需要六個來自中央氣象局即時強震站(CWB, RTD)的震波資料才能進行震源定位，普遍而言地震發生後至少約需要 12 秒才能預估震源位置。

花蓮地震(芮氏規模 6.2)發生於 2018 年 2 月 6 號當地時間晚上 11:50 分(UTC 時間下午 3:50)，震央位於北緯 24.14 度，東經 121.69 度，震源深度 10 公里，造成 17 人罹難，285 人輕重傷，4 棟建築物倒塌，超過 175 棟建築物損傷。這給了我們一個機會來比較現地型和區域型強震預警的表現，因此本研究目的為闡釋 NEEWS 的運作，並比較兩種地震預警之表現。

二、花蓮地震資料

花蓮地震期間，中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB)即時強震站(Real-Time Digital, RTD)、國震中心即時強震站(NCREE's Real-Time Seismic stations, NRTS)、及國震中心現地型強震預警系統(NCREE's on-site Earthquake Early Warning System (NEEWS)共計分別收錄到 101, 32 和 28 筆資料，其中最大水平地表加速度為 482.36gal，是由中央氣象局位於震央西方約 7 公里的即時強震站測得。

CWB RTD 測站、SANTA 測站和 NEEWS 測站的觀測資料和位置皆顯示於圖 1 中，PGA 超過 250gal 的區域明顯是沿著圖中靠近 HUL2 測站由粗黑線表示的米崙斷層分布的，各測站的詳細資料經整理並列於下列圖表 1 中。

花蓮地震震央位於 CWB RTD 測站網域外，所以需要更多的測站來定位震源位置，共計蒐集了 12 個測站的資料來發布警報。除此之外，花蓮地區的 CWB RTD 的測站密度相對較小，如圖 1 所示，因此地震發生後費時 17 秒才發布警報。

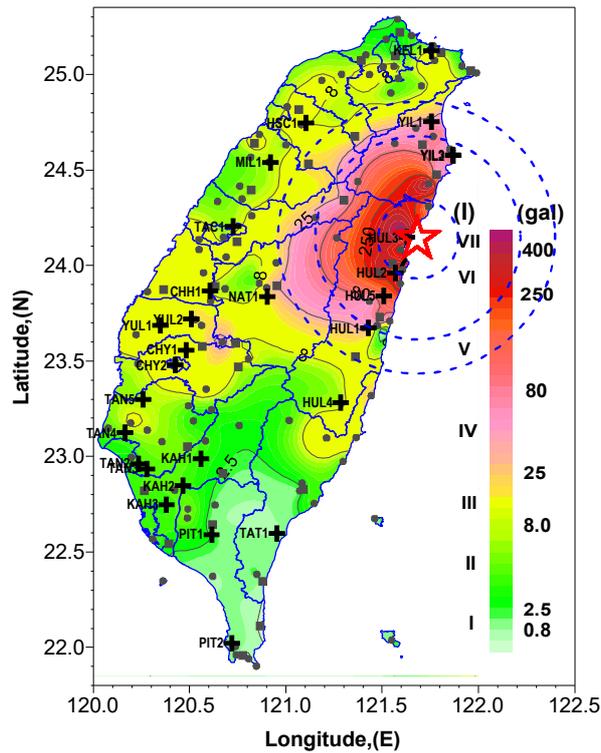


圖 1 28 座 NEEWS 測站(黑色叉叉)、101 座 RTD 測站(灰色圓形)和 32 座 SANTA(灰色矩形)的位置。背景為三座測站所測得全部 PGA 的分布圖。星型為震央位置。內、中、外圈之藍色虛線半徑分別為 23、55、75 公里，分別表示為 NEEWS 系統的作用盲區、CWB EEW 系統的作用盲區、以及 NEEWS 發布警報的速度較 CWB EEW 快速的區域。量尺刻度為水平 PGA 的值，並根據 CWB 訂定之震度表示。

表 1 NEEWS 和 CWB EEW 系統於 28 座測站的觀測數值

Station Name	Epicenter Distance (km)	Measured PGA (gal)	Measured Intensity	Alarm Threshold	NEEWS			CWB		
					Lead Time (s)	Predicted PGA (gal)	Predicted Intensity	Lead Time (s)	Predicted PGA (gal)	Predicted Intensity
HUL3	6.2	244.9	5	5	-2.8	286.6	6	-16.7	785.4	7
HUL2	23.2	219.0	5	5	-0.1	219.7	5	-11.1	219.2	5
HUL5	37.9	118.5	5	5	3.2	37.2	4	-4.7	119.7	5
YIL2	51.6	81.7	5	5	4.4	39.4	4	-1.5	84.3	5
YIL3	51.8	112.3	5	5	3.6	25.9	4	-2.4	83.7	5
HUL1	58.1	32.2	4	5	4.4	41.7	4	0.4	58.6	4
YIL1	68.2	30.5	4	5	7.2	57.3	4	5.3	55.4	4
NAT1	86.9	12.9	3	4	7.1	2.0	1	8.1	22.8	3
MIL1	89.7	7.1	2	4	4.6	13.3	3	7.7	24.0	3
HSC1	89.8	7.7	2	4	5.4	20.5	3	8.5	39.1	4
TAC1	98.1	6.9	2	4	12.8	9.3	3	16.9	24.4	3
HUL4	103.3	6.3	2	5	14.5	1.9	1	18.6	16.4	3
KEL1	109.4	7.1	2	4	8.8	7.6	2	13.9	21.8	3

CHH1	114.4	8.7	3	4	13.8	6.0	2	19.9	20.6	3
YUL2	128.8	13.6	3	4	12.1	8.5	3	24.2	23.4	3
CHY1	138.9	11.0	3	4	15.5	3.0	2	26.6	21.4	3
YUL1	145.5	10.5	3	4	15.9	0.9	1	27.9	19.1	3
CHY2	148.3	12.0	3	4	13.5	1.0	1	28.5	20.4	3
KAH1	171.9	3.8	2	4	16.4	4.6	2	36.5	7.6	2
TAN5	173.2	6.5	2	4	17.5	0.5	0	29.4	13.9	3
TAT1	186.5	1.0	1	4	15.9	0.4	0	36.0	8.9	3
KAH2	190.1	4.3	2	4	14.8	19.1	3	44.2	5.5	2
TAN4	191.9	5.0	2	4	14.7	0.5	0	26.7	14.0	3
TAN3	196.4	4.5	2	4	0.0	0.0	-	50.1	10.8	3
TAN2	197.6	4.9	2	4	7.8	0.3	0	29.9	10.5	3
PIT1	203.7	2.6	2	5	0.0	0.0	-	51.1	7.1	2
KAH3	204.1	3.0	2	4	20.9	0.5	0	47.9	6.6	2
PIT2	254.6	2.1	1	5	-11.2	10.3	3	60.4	5.7	2

三、成果表現和討論

NEEWS 和 CWB EEW 系統的基本資訊和表現都列於表 1。首先，我們來評比預估 PGA 的精準度，圖 2 顯示了全部 28 個測站，包含 NEEWS 和 CWB EEW 系統的預估 PGA 和實測 PGA 的對照圖。由圖 2 中可知，NEEWS 預估和實測 PGA 之間的均方根誤差大約為 26.2gal，而 CWB EEW 系統的均方根誤差大約為 101.1gal。造成 CWB EEW 系統如此大的均方根誤差的原因為離震央 6.2 公里的 HUL3 測站的過度預估，其 PGA 預估值為 785.4gal，然而實測 PGA 卻只有 244.9gal。若剔除 HUL3 測站，NEEWS 和 CWB EEW 系統的均方根誤差將分別降為 24.9gal 和 10.8gal。

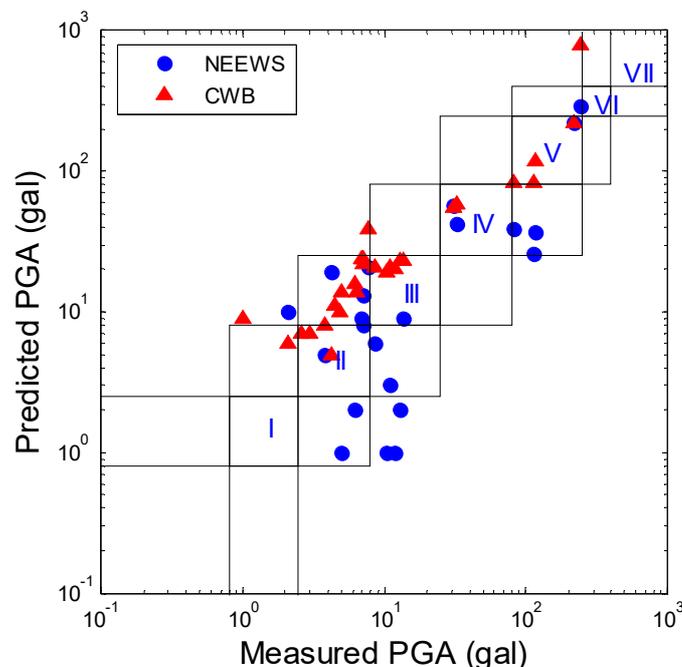
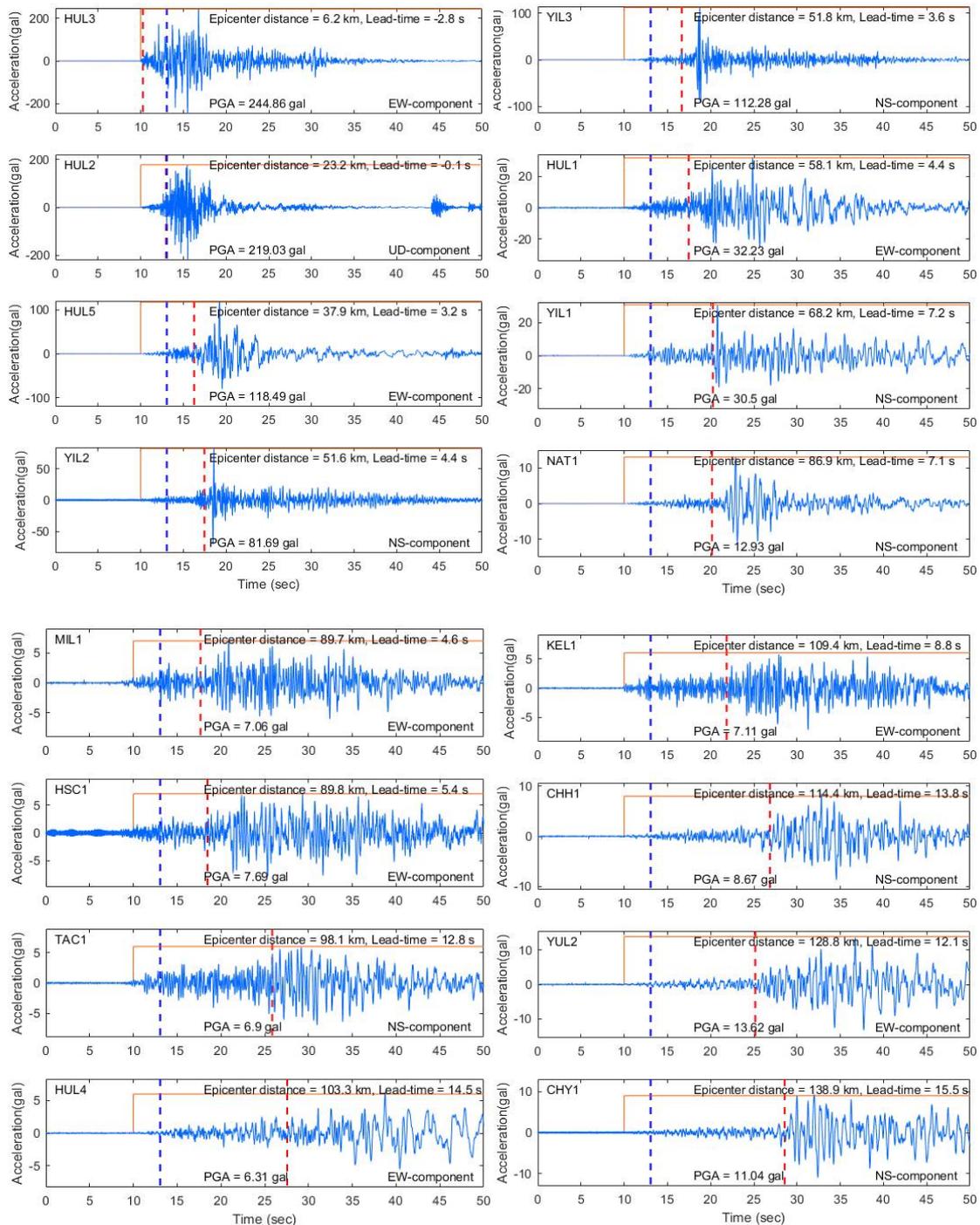


圖 2 28 個測站的預估 PGA 和實測 PGA 對照分布圖，NEEWS 和 CWB EEW 系統的均方根誤差分別為 26.gal 和 101.1gal。

中央氣象局運用地表最大加速度 PGA 來為地震強度分級，共分 8 個等級(0 級至 7 級)。在圖中，NEEWS 除了中一些實測震度小於 4 級的特例之外，強震預警與實測誤差皆在 ± 1 級範圍之內。NEEWS 發出警報中預估震度的準確率為 $18/28 = 64.3\%$ ，而 CWB 的則為 $25/28 = 89.3\%$ 。然而，低於警報發布門檻的震度被低估是不會造成影響的，若僅對震度大於 4 的測站做討論，那麼 NEEWS 的準確率將變為 $7/7 = 100\%$ ，而 CWB 則為 $6/8 = 75\%$ ，其中 HUL3 測站雖然將預估震度錯估為 7 級，實測震度僅有 5 級，但仍可接受，因為已大於警報發布門檻值，故警報仍會發布。



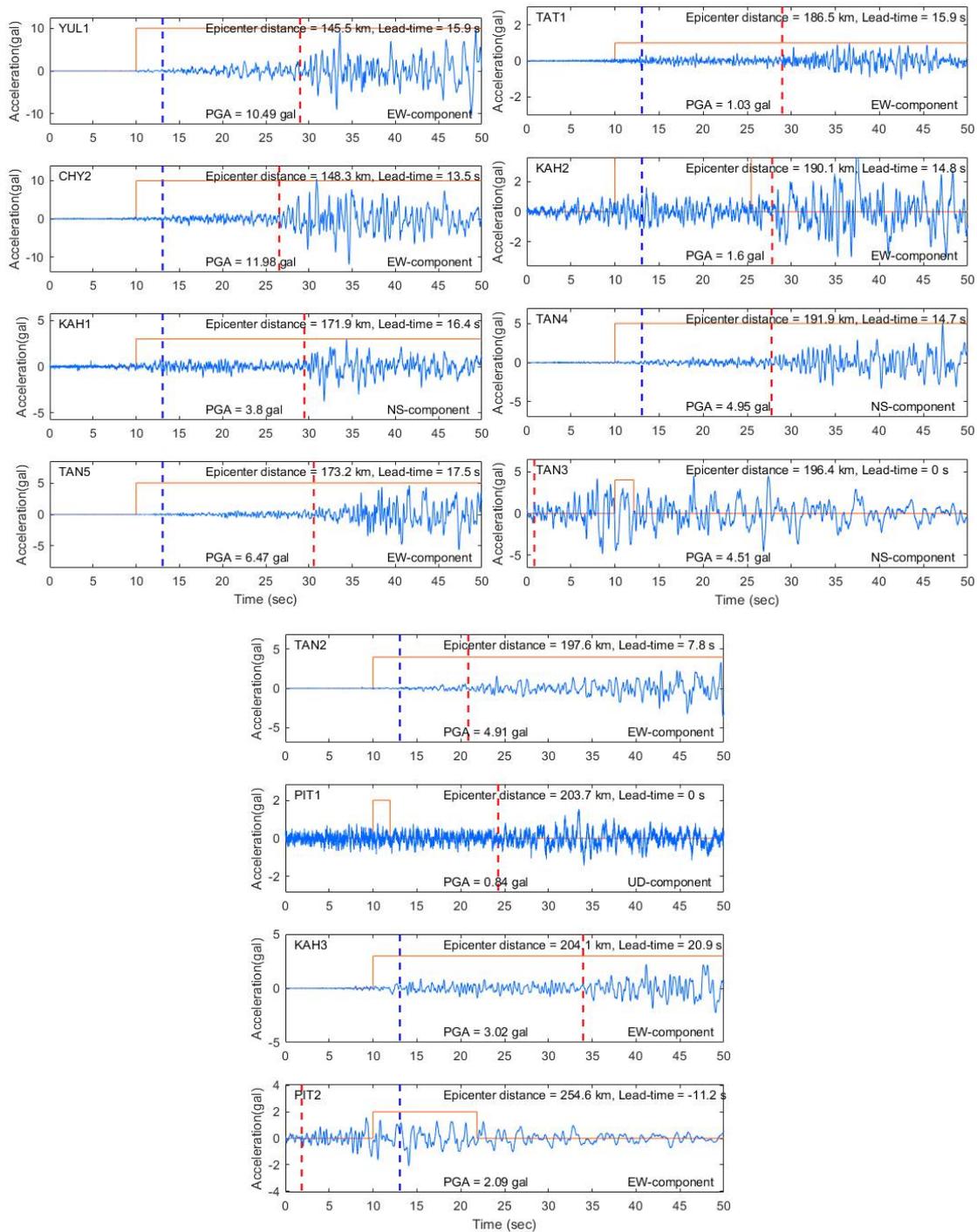


圖 3-9 NEEWS 28 個測站的加速度經歷時間和最大 PGA，排序依據震央距離遠近。警報發布時間和 S 波到達時間分別用藍線和紅線表示。橘線表示預警系統觸發持續時間。由於系統觸發持續時間小於 3 秒，TAN3 與 PIT1 測站並未發布警報，因此此二測站的預警時間為 0。

所有測站的水平加速度經歷時間皆顯示於圖 3 至圖 9 中，排序依據震央距離遠近，警報發布時間、S 波到達時間一併標示於圖中。預警時間定義為發出警報時間與 PGA 發生時間的差值。距離震央僅 6.2 公里的 HUL3 測站預警時間為 -2.8 秒(圖 3)，而距離震央 23.2 公里的 HUL2 測站預警時間趨近於 0(-0.1 秒)，由此推斷本次花蓮地震中 NEEWS 的預警盲區大約為 23 公里。

震度為 5 級的測站(HUL5、YIL2 和 YIL3)預警時間約為 3 到 4 秒，離震央約為 40 到 50 公里。預警時間與震央距離的關聯性皆顯示於圖 10 和表 1 中。圖中，預警時間普遍隨著震央距離增加而增加(兩種方法的增加趨勢在圖 10 中分別用虛線和點虛線來描繪)，除了 NEEWS 的四個測站之外(實心三角形表示)，其原因可能為訊雜比(Signal-to-noise ratio)過小，且這些測站之 PGA 小於 5gal，亦即地震之振幅太小，以致於沒有觸發，直到較大振幅之地震波到達後始觸發，故預警時間較短，不過因為這些測站實際震度未達預設門檻，不需發布警報，因此即使該測站預警時間較短，亦不會造成任何實際不良影響。

除此之外，我們觀察到在距離震央半徑 75 公里內的區域(圖 1 所示)，NEEWS 的預警時間是多於 CWB 系統的，明顯能為強震區域爭取更多預警時間，相反的，離震央愈遠，CWB EEW 系統就有愈長的預警時間。我們認為若是警報能爭取 3 到 4 秒的預警時間，讓使用者能有時間採取行動避難，那麼預警就是成功的。對於自動化控制的系統，甚至能夠立即根據警報而採取動作。

NEEWS 系統之各測站設定之警報門檻值(Ii)依據使用者需求進行客製化，除東部地區外，警報門檻值均設定為震度四級，東部地區則設定為震度五級始發出警報。

為了評估系統的成效，我們對於 Meier (2017)提出的「預警分類」稍做修改。若警報在到達門檻前就發布，而震度確實大於門檻，我們稱為真陽性(true positive, TP)，且有有效的預警時間；相對的，若警報發布，但震度卻未超過門檻，我們稱為偽陽性(false positive, FP)；若震度超過門檻卻無警報發布，我們稱為偽陰性(false negative, FN)，就算後來有補發布警報，仍然認定為 FN。由於真陰性(true negative, TN)太容易達到，即震度未達警報門檻，而警報也未發布，因此本研究僅針對 TP、FP 和 FN 進行討論。

花蓮地震期間，依據各測站的預設門檻，NEEWS 的 TP、FN 和 FP 百分比分別為 0%、100%、0%。TP 為 0%是因為 HUL2 和 HUL3 測站離震央過近(小於 25 公里)，因此沒有預警時間，儘管預測 PGA 的精準度是很高的。此外，雖然 HUL2、HUL5、YIL2 和 YIL3 有大約 3 到 4 秒的預警時間，但由於預測震度被低估，因此沒有正確的發布警報。

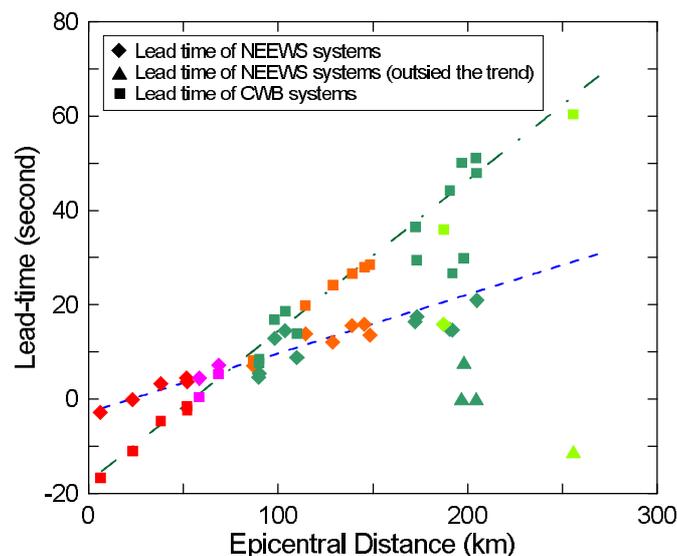


圖 10 預警時間與震央距離的關係圖。菱形和三角形代表 NEEWS，藍色虛線標示多數 NEEWS 測站普遍的趨勢，矩形則代表 CWB EEW 系統，綠色點虛線描繪 CWB EEW 系統測站普遍的趨勢。紅、粉、橘、綠及亮綠色分別代表 5、4、3、2、1 級震度。

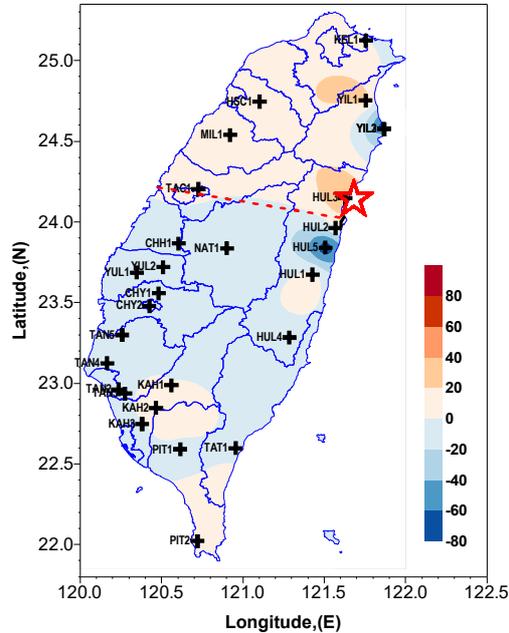


圖 11 PGA 差異分布。定義為:預估 PGA-實測 PGA。震央南邊區域(以紅線分隔)的 PGA 差異多為負的，相反的，北方區域則多為正的。

而 CWB EEW 系統的 TP、FN 和 FP 百分比分別為 0%、83.3%、16.7%，雖然 HUL3, HUL2, HUL5, YIL2, 和 YIL3 測站的預估震度已超過預設門檻，但預警時間為負，因為在警報發布前 S 波就已到達。另外 CWB EEW 系統發布了一個 FP 警報，因為 HSC1 測站的實測震度為 2 級，但預估震度卻為 4 級。

若定±1 級為預估震度的容許誤差，那麼警報發布且震度大於或等於 I_i-1 ，我們認定為 TP，但若震度比門檻低超過一級，我們將認定為 FP。若警報未發布但震度超過 I_i+1 ，我們認定為 FN。經容許誤差重新調整後，NEEWS 的 TP、FN 和 FP 百分比分別為 60%、40%、0%，然而 CWB EEW 系統的卻仍然沒有改進。若將容許誤差調整為±0.5 級，其結果仍然與±1 級相同。

因為震源方向的影响尚未於預估 PGA 的演算法中被考慮，所以 PGA 的差異(定義為:預估 PGA-實測 PGA)分布或許可以顯示斷層破裂的指向性與破裂方向的關聯性。在圖 11 中，震央南邊區域(以紅線分隔)的 PGA 差異多為負的，相反的，北方區域則多為正的。換句話說，位於震央南邊的測站實測 PGA 大多大於預估 PGA，北邊測站的狀況則相反。此外，YIL3 測站的 PGA 明顯被低估，該測站設立於 2017 年 6 月，因此僅有少數地震紀錄，所以我們需要更多的地震資料才能了解 PGA 被低估的原因。

五、結論與未來展望

雖然花蓮地震造成 17 人罹難和超過 175 棟建築物受損，但也提供一個能驗證 NEEWS 性能表現的機會。這次的網域系統是由中保防災科技公司(SIGMU DPT)提供，該系統以 NEEWS 和 CWB EEW 系統的資料來發布警報，這讓研究者能同時比較此兩種系統，是目前世界唯一於真實地震中比較現地型與區域型地震預警系統的寶貴資料。

結果發現，這兩種系統對於 PGA 的預測精準度都非常高，對於震度 4 以上的精準度也是。NEEWS 在觸發後須費時 3 秒來發布警報，在此次花蓮地震的警報盲區大約是半徑 23 公里，而 CWB EEW 大約是 55 公里。多數位於震度大於 5 級區域附近的 NEEWS 測站約有 3 到 4 秒的預警時間。CWB EEW 約在離震央 75 公里以外的區域才能趕上 NEEWS 的預警時間，但 PGA 超過 25gal(震度 4 級以上)的位置多在此範圍內，而 CWB EEW 系統卻在此範圍外才能提供更多的預警時間。

雖然這兩種預警系統的 PGA 預測準確度和震度預測普遍有效，但對於花蓮地震中經歷強度大於門檻值的地方，預警時間才是決定性的關鍵。基於 Meier (2017)提出的指標(已對台灣現況進行修正)，CWB EEW 在預警分類 TP、FN 和 FP 百分比的表現分別為 0%、83.3%、16.7%。換句話說，CWB EEW 警報未正確的即時發布，而且即使在合理的容許誤差下，CWB EEW 仍然發布了一個 FP 警報，相較之下，NEEWS 的現地型預警在 TP、FN 和 FP 百分比的表現分別為 60%、40%、0%。

NEEWS 在預警分類的表現仍有進步的潛力，尤其是在容易發生嚴重破壞的震央附近，而受到致命的地震影響的人口大多集中於這兩種 EEW 系統的盲區。為了能爭取更多的預警時間，NEEWS 正在測試能夠於 P 波到達後 1 秒便預估出 PGA 的模組，希望未來能有效的運用於各個 NEEWS 測站。

中保防災科技公司是基於 NEEWS 和 CWB EEW 系統的資料來發布警報的，在合理的容許誤差下，TP、FN 和 FP 百分比的綜合表現分別為 $3 / 6 = 50.0\%$, $2 / 6 = 33.3\%$, and $1 / 6 = 16.7\%$ 。中保防災科技公司正在將吳逸民博士(Wu 等, 2013)於台灣大學研發的 P-Alert 現地型地震預警裝置安裝於 NEEWS 的測站，我們也期望在不久的將來，台灣的學校能受益於由 NEEWS, CWB, and P-Alert 構成的複合 EEW 系統。

參考文獻

1. Allen, R. M., P. Gasparini, O. Kamigaichi, and M. Böse (2009), The status of earthquake early warning around the world: An introductory overview, *Seismol. Res. Lett.*, 80, 682-693, doi: 10.1785/gssrl.80.5.682.
2. Böse, M., T. Heaton, E. Hauksson (2012), Rapid estimation of earthquake source and ground-motion parameters for earthquake early warning using data from a single three-component broadband or strong-motion sensor, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 102(2), 738–750.
3. Carranza, M., E. Buforn, S. Colombelli, and A. Zollo, (2013), Earthquake early warning for southern Iberia: A P wave threshold-based approach, *Geophys. Res. Lett.*, 40(17).
4. Caruso, A., S. Colombelli, L. Elia, M. Picozzi, and A. Zollo, (2017), An on-site alert level early warning system for Italy, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122(3), 2106-2118.

5. Emolo, A., M. Picozzi, G. Festa, C. Martino, S. Colombelli, A. Caruso, L. Elia, A. Zollo, P. Brondi, N. Miranda, (2016), Earthquake early warning feasibility in the Campania region (southern Italy) and demonstration system for public school buildings, *Bull. Earthquake Eng.*, 14(9).
6. Hsu, T.Y., S.K. Huang, Y.W. Chang, C.H. Kuo, C.M. Lin, T.M. Chang, K.L. Wen and C.H. Loh (2013), Rapid on-site peak ground acceleration estimation based on support vector regression and P-wave features in Taiwan, *Soil Dynam. Earthq. Eng.* 49, 210–217, doi:10.1016/j.soildyn.2013.03.001
7. Hsu, T. Y., H. H. Wang, P. Y. Lin, C. M. Lin, C. H. Kuo, and K. L. Wen (2016), Performance of the NCREE's on-site warning system during the 5 February 2016 Mw 6.53 Meinong earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 8954–8959.
8. Kanamori, H. (2005). Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 33, 195–214.
9. Meier, M. A. (2017), How “good” are real-time ground motion predictions from Earthquake Early Warning systems?, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, doi:10.1002/2017JB014025.
10. Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S.Sato, K. Ohtake, D. Nozaka (2003), A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93(1), 526–532.
11. Peng, C., J. Yang, Y. Chen, X. Zhu, Z. Xu, Y. Zheng, and X. Jiang, (2015), Application of a Threshold-Based Earthquake Early Warning Method to the Mw, 6.6 Lushan Earthquake, Sichuan, China, *Seismol. Res. Lett.*, 86(3), 841-847.
12. Zollo, A., O. Amoroso, M. Lancieri, Y. M. Wu, and H. Kanamori, (2010), A Threshold-based Earthquake Early Warning using dense accelerometer networks, *Geophys. J. Int.*, 183, 963–974.

致謝

本研究感謝本校臺灣建築科技中心獲教育部「高教深耕之特色領域研究中心計畫」補助經費。